

干湿循环作用诱发裂隙开展对膨胀土的 压缩模量的影响

张磊¹, 刘云龙¹, 侯振国²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对膨胀土在自然降水-蒸发循环作用下, 土体产生显著的胀缩变形过程中裂隙不断萌生并扩展, 极易引发边坡崩裂、失稳等工程灾害问题, 以河南省南阳市膨胀土为研究对象, 对干湿循环作用下裂隙膨胀土的压缩模量劣化问题进行研究, 通过1~3次干湿循环试验结合CT扫描技术, 分析裂隙发育特征及其对压缩模量的影响。试验结果表明: 干湿循环次数显著加剧裂隙扩展, 首次循环仅形成局部微裂隙, 第二次循环裂隙最大深度达55 mm, 第三次循环裂隙完全贯穿试样(65 mm), 且裂隙率自上而下递减。通过改进侧限压缩装置, 揭示了压缩过程的三阶段规律, 并发现压缩模量随循环次数增加而系统性降低, 主要归因于裂隙导致的有效承载面积减小及咬合力减弱。随着压缩过程进行, 经历较多干湿循环的试样因其初始裂隙网络更发达、连通性更强, 压缩模量的提升幅度显著受限, 体现了干湿循环对土体压缩特性的累积损伤效应。

关键词: 裂隙膨胀土; 干湿循环; CT扫描; 压缩模量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)04-0170-06

Effects of Cyclic Drying-wetting Induced Crack Propagation on Compression Modulus of Expansive Soils

ZHANG Lei¹, LIU Yunlong¹, HOU Zhenguo²

(1. Department of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Expansive soils containing significant amounts of hydrophilic minerals (e. g., montmorillonite and illite) undergo substantial swell-shrink deformation under natural precipitation-evaporation cycles. During this process, desiccation cracks initiate and propagate progressively, readily inducing engineering hazards such as slope cracking and instability. This work investigates the deterioration of compression modulus in cracked expansive soils subjected to W-D cycles, using soil samples from Nanyang City, Henan Province. Through 1~3 W-D cycles combined with CT scanning technology, the crack propagation characteristics and their impacts on compression modulus were quantitatively analyzed. Experimental results demonstrate that cyclic wetting-drying significantly aggravates crack development: initial cycle produces only localized micro-cracks, the second cycle extends cracks to 55 mm maximum depth, while the third cycle generates fully penetrating cracks (65 mm) with surface-to-base decreasing crack ratio distribution. Using a modified confined compression device, three-stage compression characteristics were identified, showing systematic reduction of compression modulus with increasing cycles, primarily attributed to reduced effective bearing area and weakened interparticle bonding caused by cracking. As the compression process proceeds, samples that have undergone more W-D cycles exhibit a significantly limited increase in compression modulus due to their more developed and interconnected initial crack network. This reflects the cumulative damage effect of W-D cycles on the compressive characteristics of the soil.

Keywords: cracked expansive soil; wetting-drying cycles; CT scanning; compression modulus

收稿日期: 2025-03-01

修稿日期: 2025-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52478372)

作者简介: 张磊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为膨胀土以及黄土地基处理。E-mail: 15993773094@163.com

通讯作者: 刘云龙(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事膨胀土及其它特殊土地基处理方面的研究工作。

E-mail: liuyunlongzhu@hotmail.com

膨胀土由亲水性矿物(如蒙脱石和伊利石)组成,具有胀缩性、裂隙性和超固结特性。膨胀土分布与地质成因、气候、水文和地貌密切相关,存在范围已超过 40 个国家^[1-2]。在降雨入渗和蒸发作用下,膨胀土反复吸水膨胀、失水收缩,形成复杂裂隙网络,增加渗透性,降低保水能力和强度^[3-5]。这将引发诸多工程问题,如边坡失稳、地基不均匀沉降和路面开裂^[6-7]。例如,南阳地区建筑物开裂^[8]以及广西国道路基开裂沉降^[9]均与裂隙发育有关。

为探明影响膨胀土裂隙变化的因素,许多学者进行了一系列研究。韦秉旭等^[10]研究发现,增大压实度能抑制干湿循环下压实膨胀土的裂隙扩展,裂隙率、分形维数与黏聚力呈线性关系;汪时机等^[11]研究发现,膨胀土裂隙演化分三个阶段,黏聚力衰减是强度降低主因,裂隙面积率与强度衰减关联性强。除此之外,还有学者将目光放在了膨胀土压缩模量影响因素的研究上。范文晓^[12]发现膨胀土的压缩模量受初始吸力、上覆应力、浸水引起的微观孔隙结构演变(以 $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ 大孔压缩为主)和团聚体松散化共同影响,随吸力降低、应力增大及浸水导致的孔隙闭合与团聚体解体显著降低;边加敏^[13]发现膨胀土的压缩模量受石灰掺入比例、干湿循环次数和含水率变化的影响,其中高掺灰率(如 4%~6%)可有效减少吸水导致的模量衰减,干湿循环初期显著削弱其稳定性。

综上所述,现阶段对裂隙膨胀土的研究主要集中在裂隙的形态和定量分析方面,对于裂隙影响下的膨胀土压缩模量指标的研究仍不充足,尤其是膨胀土在经历干湿循环后的压缩模量变化规律及其与土体裂隙的关系并未明确。因此,本文拟采用南阳膨胀土制备试样,通过自制试样筒模拟工程现场的增湿-蒸发环境,进行 1~3 次干湿循环试验;利用 CT 扫描获取不同循环次数后试样的三维裂隙分布特征,并计算截面裂隙率;采用改进侧限压缩仪对不同干湿循环次数、不同含水率的膨胀土样进行侧限压缩试验;分析含水率变化对压缩模量的影响规律,以期膨胀土地基上建筑物的施工和运营提供技术依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

所用膨胀土取自河南省南阳市某铁路项目 1.5 m~2 m 深处,经自然风干、粉碎过 2 mm 筛后储存备用,如图 1 所示。依据《土工试验方法标准》^[14](GB

T 50123—2019)和《公路土工试验规程》^[15](JTG 3430—2020)进行基本物理性质试验,试验结果如表 1 所示。

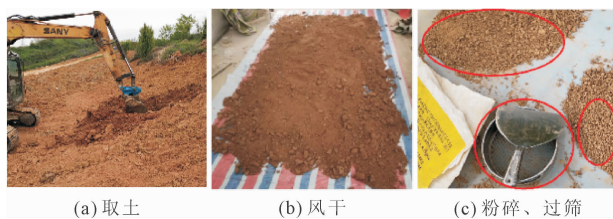


图 1 试验用土的准备

表 1 试验土样基本物性指标

天然含水率 w /%	天然密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	孔隙比 e	自由膨胀率 ζ_s /%	液限 w_L /%	塑限 w_P /%
22.63	2.06	2.58	0.80	65.20	57.17	36.41

1.2 干湿循环试验

为探究裂隙膨胀土在干湿循环过程中的结构损伤演变规律,采用干湿循环试验与图像识别技术相结合的方法展开研究。将含水率为 22.63% 的膨胀土试样分三层装入特制有机玻璃试样筒(直径 70 mm,高度 65 mm)中逐层压实,每层压实后拉毛表面以保证层间结合,压实度控制在 95%;随后采用真空饱和法对试样进行增湿饱和,使用叠式饱和器限制膨胀变形,浸泡 48 h 确保充分饱和;最后通过自制干湿循环箱模拟自然环境,如图 2 所示,采用浴霸灯加热(表面温度 50°C)进行干燥脱湿,部分试样通过自然浸水恢复含水率,水分含量变化路径如图 3 所示。根据胡东旭等^[16]、杨振北^[17]的研究,膨胀土在进行 3 次干湿循环后,后续的干湿循环对土体性质的影响可以忽略不计。因此,进行 3 次干湿循环试验,并通过 CT 扫描技术可获取不同循环次数下不同深度裂隙的分布图像^[18]。

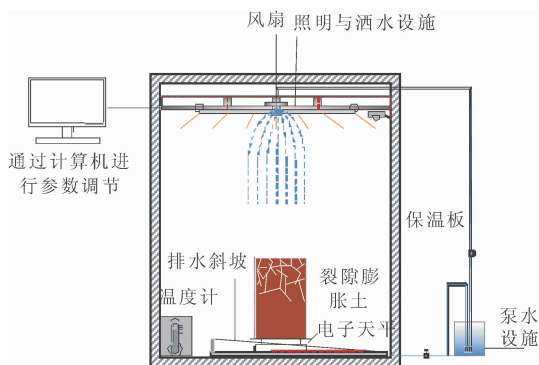


图 2 试验箱示意简图

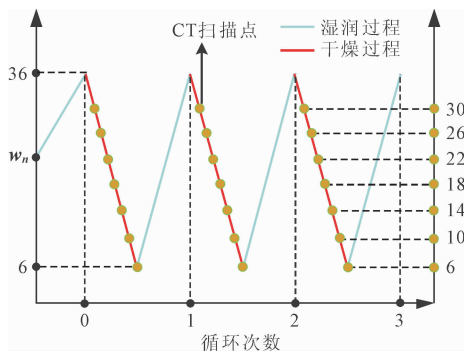


图3 水分含量变化路径与 CT 扫描点干湿循环过程

1.3 裂隙膨胀土界面裂隙率的计算

CT 扫描图像通过 MATLAB 程序进行灰度分析处理^[19],以获取裂隙面积,如图 4 所示。随后,利用公式(1)计算裂隙率^[20],结果如图 5 所示。在第 1 次循环中,裂缝宽度相对较小,且未出现裂缝贯穿土样。在第 2 次和第 3 次循环中,裂缝的发展加剧。这表明随着循环次数的增加,土体结构进一步受损。此外,裂缝的分布从最初的均匀模式转变为更复杂的圆形分布。对于所有三个循环次数的样品,裂隙率随着深度的增加逐渐减小,最大裂隙率出现在样品表面。同时,在渗透条件下,发育的裂缝会发生不完全愈合,在样品内部形成优先流路径。因此,垂直裂缝更有可能在样品内扩展。在第 2 次循环中,裂缝延伸至 55 mm 深度。到第 3 次循环时,裂缝已到达土样底部(65 mm)。其他含水量样本的裂隙率变化模式总体上与 10% 含水量样本相似,仅在裂缝发育深度和最大裂隙率方面存在差异。因此以 10% 含水量样本为例研究膨胀土结构损伤演变规律。

$$R_c = \frac{A_c}{A} \quad (1)$$

式中: R_c 表示截面裂隙率; A_c 表示试样截面中裂隙的面积; A 表示试样截面无裂隙时的总面积。

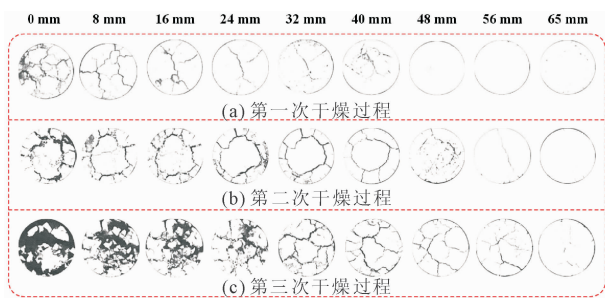


图4 含水量为 10% 的裂隙膨胀土样本的 CT 扫描图像

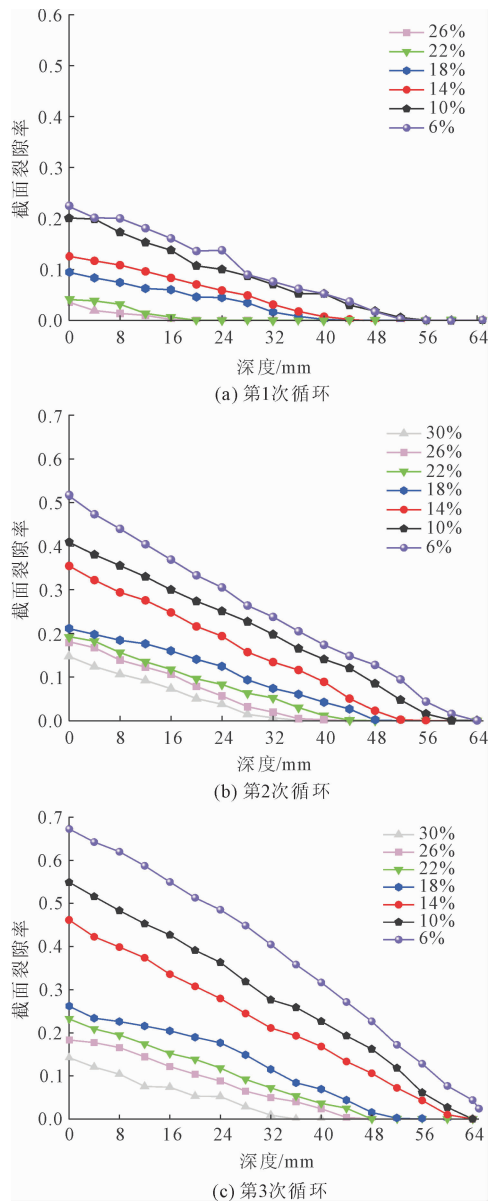


图5 不同干湿循环次数的试样截面裂隙率曲线

1.4 侧限压缩试验

为了测量干湿循环后膨胀土的压缩模量,对传统侧限压缩装置进行改进,并开展侧限压缩试验,试验装置(包括百分表与压力传感器的设置)如图 6 所示。主要改进措施包括:①加高压力室与环刀结构,以适配高度为 65 mm 的试样;②增设试样外围的钢构件,以确保严格的侧向约束条件。改进后的装置能够获取侧限条件下的应力-应变曲线及压缩模量,为分析裂隙膨胀土的压缩特性提供了可靠的试验手段。试验方案如表 2 所示,试验采用经过 1 至 3 次干湿循环的裂隙膨胀土试样,试样按干湿循环次数分为三组,每组包含 6 至 7 个不同含水量的

试样(含水量范围为 6%~26%)。具体的侧限压缩试验步骤如下:①将护环对准压力室中心放置,放入透水石,随后将试样放入改进后的固结仪压力室中,并依次放置透水石、加压上盖和压力传感器,用于监测试验过程中施加压力的变化。②调平固结仪杠杆,将加压框架置于垂直位置,转动加压框架上部的传压活塞,使其与压力传感器紧密接触。当固结仪杠杆平衡发生变化时,即认为两者已充分接触,随后对压力传感器进行调零。③安装并调零加压框架上部的百分表,用于测量侧向压缩过程中土体的竖向变形。④完成以上步骤后,即可施加设计荷载。

试验选用失水阶段的试样,以排除裂缝闭合现象的干扰,更准确地表征裂缝对膨胀土刚度参数的影响。根据《公路土工试验规程》^[15]和以往研究^[21-24],本次固结压缩试验的最大荷载确定为 2 500 kPa。

表 2 裂隙膨胀土的压缩试验方案

试验编号	循环次数	含水率 w/%	试验编号	循环次数	含水率 w/%	试验编号	循环次数	含水率 w/%
DW1-1	6	6	DW2-1	6	6	DW3-1	6	6
DW1-2	10	10	DW2-2	10	10	DW3-2	10	10
DW1-3	14	14	DW2-3	14	14	DW3-3	14	14
DW1-4	1	18	DW2-4	2	18	DW3-4	3	18
DW1-5	22	22	DW2-5	22	22	DW3-5	22	22
DW1-6	26	26	DW2-6	26	26	DW3-6	26	26
			DW2-7	30	30	DW3-7	30	30

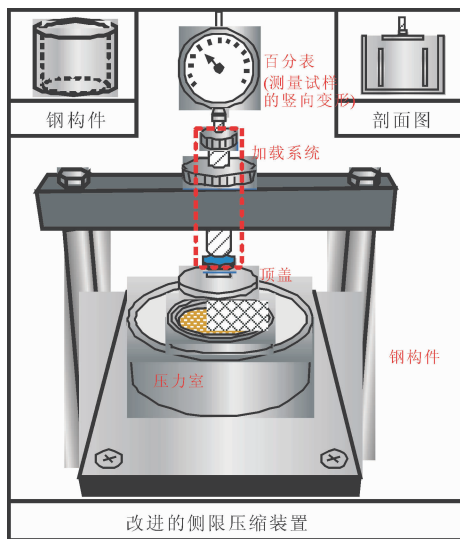


图 6 改进的侧限压缩装置

2 试验结果分析

2.1 干燥过程中柱内土样裂隙形态特征

如图 4 与图 5 所示,干湿循环作用对膨胀土裂隙发育的影响呈现出明显的渐进性特征。在首次干湿循环中,试样仅产生局部微裂隙,裂隙宽度较小且未形成贯穿性裂隙,表明初始循环对土体结构的破坏程度有限。随着循环次数增加至第二次,裂隙网络显著扩展,最大发育深度达到 55 mm,裂隙形态开始由均匀分布向复杂化转变。当进行第三次干湿循环时,裂隙已完全贯穿整个试样(深度 65 mm),并在试样表面形成最大裂隙比例区,呈现出自上而下递减的分布特征。值得注意的是,渗透条件下的裂隙表现出不完全愈合特性,这种不可逆损伤形成了优势渗流通道^[1]。裂隙形态演化方面,经历了从初始均匀分布到复杂环状构型的转变过程,反映了土体结构损伤的累积效应。对比不同含水量试样的测试结果发现,虽然裂隙发育深度和最大裂隙比例存在差异,但总体呈现出相似的发展规律:即随干湿循环次数增加,裂隙扩展程度加剧,土体完整性持续劣化。

2.2 侧限压缩试验结果分析

图 7 展示了不同干湿循环次数和水分条件下裂隙膨胀土试样的应力-应变曲线特征。曲线演化呈现明显的三阶段规律:第一阶段为“裂隙闭合阶段”,在较小荷载作用下土体保持原有结构框架,部分裂隙开始闭合;第二阶段为“闭合填充阶段”,裂隙进一步闭合并由破碎颗粒填充,压缩模量逐渐提高;第三阶段为“最终压密阶段”,裂隙完全闭合形成密实结构,模量显著增大。微观观测显示,各阶段对应着不同的结构演化特征:裂隙闭合阶段主裂缝尺寸较大,周围分布次级裂缝;闭合填充阶段主裂缝尺寸减小,次级裂缝逐渐闭合;最终固结阶段仅保留少量主裂缝,土体呈现高度密实状态。从微观机制来看,干湿循环作用下的应力-应变行为受三个关键过程控制:初始循环形成裂隙网络导致模量降低;后续荷载作用下颗粒破碎填充裂隙,模量逐步恢复;最终形成新的平衡结构。多次循环通过三种机制加剧劣化:①周期性胀缩扩展裂隙网络;②胶结物流失降低界面摩擦;③颗粒破碎改变级配特征。这些不可逆损伤宏观表现为裂隙连通性增加、颗粒咬合作用减弱,最终导致各阶段模量系统性降低^[25-26]。

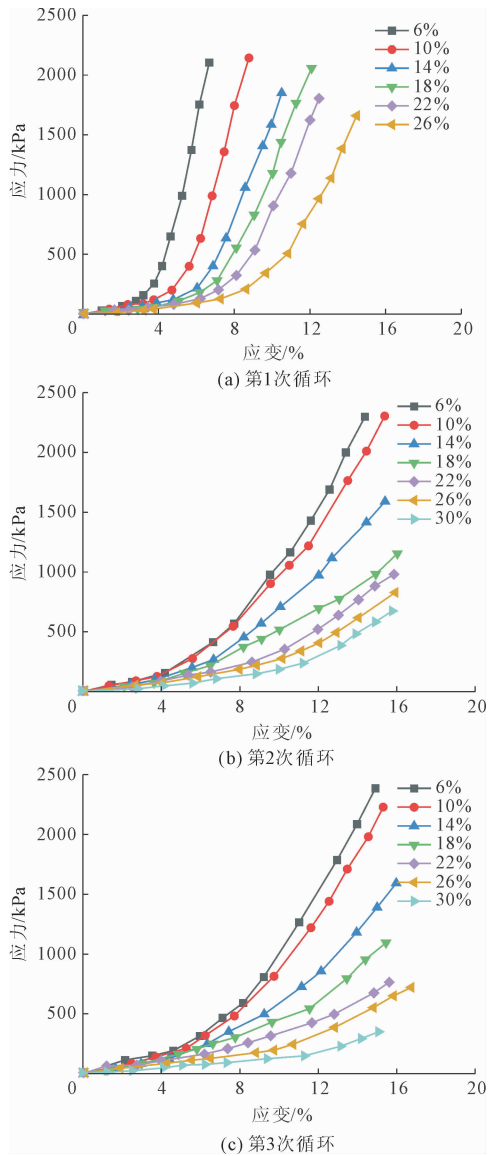


图 7 不同干湿循环次数下裂隙膨胀土的应力-应变曲线(侧限条件)

2.3 压缩模量计算结果分析

不同干湿循环次数下压缩模量与含水率的关系曲线如图 8 所示。图 8(a) 揭示了不同干湿循环条件下裂隙闭合阶段压缩模量与含水量的变化规律。在相同干燥阶段,含水量降低导致基质吸力增大,气-水弯月面曲率增加并趋于稳定,促使土颗粒排列更加紧密,从而提升压缩模量。值得注意的是,当含水量相同时,随着循环次数增加,压缩模量呈现递减趋势,这主要归因于裂隙比例的增加改变了土颗粒连接方式。裂隙附近颗粒接触面积减小,显著降低了咬合力和摩擦力,进而削弱了土体抵抗变形的能力。从细观力学角度分析,可将土样沿深度划分为多个微元体,其中裂隙将完整土体分割为若干块体。

在恒定上覆荷载作用下,有效承载面积减小导致单个土块承受应力增大。虽然单个土块的压缩模量保持不变,但增大的应力引发更大的应变,最终表现为整体压缩模量的降低。此外,如图 5 所示,对于含水量为 10% 的土样,其截面裂隙率随深度的变化表明,随着干湿循环次数的增加,裂隙率有了显著的提升,这进一步证实了裂隙开展对土体压缩模量的重要影响。

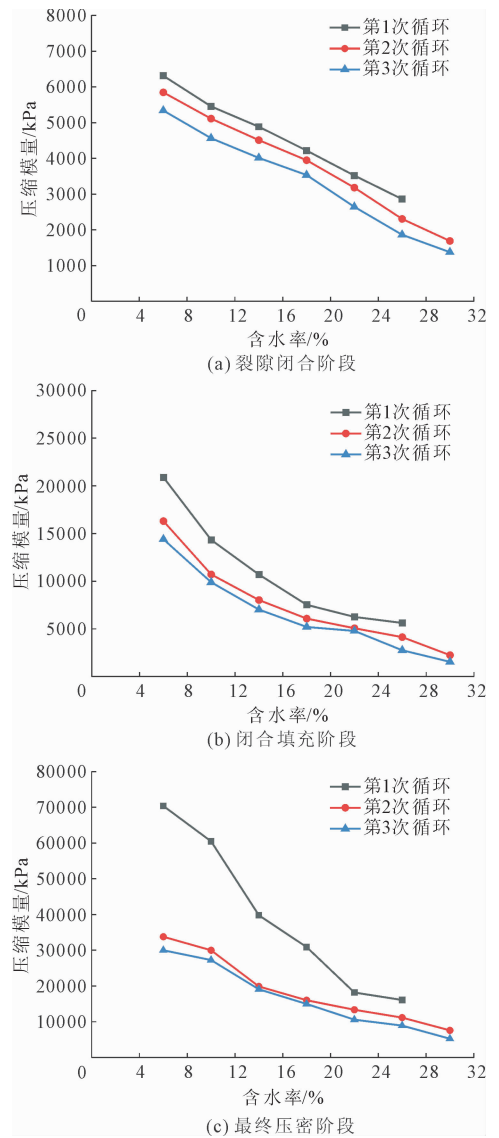


图 8 不同干湿循环次数下压缩模量与含水率的关系曲线

图 8(b) 和图 8(c) 分别呈现了闭合填充阶段和最终致密化阶段的压缩模量变化特征。随着压缩过程推进,各阶段压缩模量均较前一阶段有所提升,这源于裂隙闭合和土体压缩共同作用增强了结构完整性。具体表现为:颗粒接触面积增加,摩擦力和咬合力显著提高。这一过程伴随着裂隙的逐渐闭合,裂隙的闭合减少了土体内部的薄弱环节,使得土颗粒

之间的连接更加紧密,从而提高了土体的整体压缩模量。

对比不同循环次数试样的表现可见,循环次数较少的试样初始裂隙发育程度较低,在压缩过程中裂隙愈合更快,更易形成致密结构,因此表现出更高的压缩模量;而多次循环试样由于初始裂隙网络更为发达,其模量提升幅度相对有限。这一现象清晰地揭示了干湿循环历史对土体压缩特性的累积损伤效应。进一步分析表明,随着干湿循环次数的增加,土体内部的裂隙不仅数量增多,而且连通性增强,形成了更为复杂的裂隙网络。这种裂隙网络的存在使得土体在压缩过程中应力分布更加不均匀,部分区域应力集中,导致局部变形较大,而其它区域则可能尚未充分发挥其承载能力。因此,尽管整体压缩模量有所提高,但其提升幅度受到裂隙网络复杂性的限制。从损伤力学的角度来看,裂隙的扩展和连通可以被视为土体内部损伤的积累,每一次干湿循环都可能造成新的微裂隙或使现有裂隙进一步扩展,从而逐渐降低土体的承载能力。这种累积损伤效应在多次循环后变得更加显著,使得土体的压缩性质发生不可逆的变化^[27]。

3 结论

本研究通过干湿循环试验、CT扫描技术和自制侧限压缩装置的侧限压缩试验,系统研究了裂隙膨胀土在干湿循环作用下的压缩模量劣化规律及其与裂隙损伤的关系,主要得出以下结论:

(1) 干湿循环次数显著影响膨胀土的裂隙发育。首次循环仅产生局部微裂隙,未形成贯穿性裂隙;第二次循环裂隙网络扩展,最大深度达55 mm;第三次循环裂隙完全贯穿试样(65 mm),且裂隙率自上而下递减。裂隙形态从均匀分布逐渐演变为复杂环状构型,表明土体结构损伤具有累积效应。

(2) 压缩过程共分为三个阶段。在裂隙闭合阶段,荷载作用下裂隙开始闭合且压缩模量较低;进入闭合填充阶段,裂隙进一步闭合并由破碎颗粒填充,模量逐步提高;最终在压密阶段,裂隙完全闭合形成密实结构,模量显著增大。而多次循环试样因初始裂隙网络更发达,模量提升幅度有限,表明干湿循环对土体压缩特性具有不可逆的累积损伤效应。

(3) 压缩模量随干湿循环次数增加而显著降低。相同含水量条件下,循环次数越多,压缩模量越小,主要归因于裂隙比例增加导致土颗粒连接方式改变,接触面积减小,咬合力和摩擦力减弱。此外,

含水量降低(基质吸力增大)会提升压缩模量,但干湿循环的损伤效应仍占主导。

参考文献:

- [1] Liu Yunlong, Zhao Yingao, Vanapalli S K, et al. Soil-water characteristic curve of expansive soils considering cumulative damage effects of wetting and drying cycles [J]. *Engineering Geology*, 2024, 339:107642.
- [2] Huang Runqiu, Wu Lizhou. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6):129-133.
- [3] Oh W T, Vanapalli S K. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(5):649-657.
- [4] 靳福杰,王叶娇,徐永福,等. 蒸发-降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1):239-249.
- [5] 李国维,巩齐齐,李涛,等. 崩解性砂岩改良弱膨胀土性状实验研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(1):34-43.
- [6] 杨济铭,张红日,陈林,等. 基于数字图像相关技术的膨胀土边坡裂隙形态演化规律分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1):225-238.
- [7] 路钊驰,杨忠年,刘继明,等. 冻结橡胶加筋膨胀土(ESR)的动力特性研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5):1312-1319.
- [8] 卢冰,刘川顺,牛飞,等. 南阳膨胀土地区房屋开裂的原因和治理对策[J]. *土工基础*, 2008(5):39-40, 58.
- [9] Zhang Hongri, Yang Jiming, Wang Lei, et al. Experimental and numerical investigation on failure mechanism of expansive soil subgrade slope [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1):19795.
- [10] 韦秉旭,黄震,高兵. 压实膨胀土表面裂隙发育规律及与强度关系研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(1):100-105.
- [11] 汪时机,杨振北,李贤,等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5):113-122.
- [12] 范文晓. 南阳膨胀土浸水变形特性及微观结构研究[J]. *建筑科学*, 2025, 41(1):126-135.
- [13] 边加敏. 石灰改良膨胀土的水稳性研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(1):77-82.
- [14] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019. [S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [15] 公路土工试验规程:JTG 3430—2020 [S]. 北京:人民交通出版社,2020.

- [6] 王樱峻,赵琳,雷显阳,等. 抽水蓄能电站高沥青混凝土面板堆石坝设计[J]. 人民长江,2022,53(1):148-153.
- [7] 顾淦臣,沈长松,岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [8] Wang Weibiao, Höeg K, Zhang Yinbo. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam[J]. Canadian Geotechnical Journal,2010,47(12):1365-1381.
- [9] 只炳成,宋志强,王飞. 深厚覆盖层特性变化对沥青混凝土心墙坝动力反应影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):189-194.
- [10] 何建新,王景,杨海华. 尼雅水库坝料动力特性研究及三维地震反应分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):53-61.
- [11] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等. 高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(12):2254-2261.
- [12] Fang Huolang, Tashiro Yukie, 田代幸英,等. Aseismic design of reservoir faced wholly with asphalt concrete (English)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(8):1550-1562.
- [13] 王辉,岑威钧,王栋良,等. 强震区某沥青混凝土面板堆石高坝抗震安全性分析[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(5):165-171.
- [14] 王栋良,唐杰,王辉. 强震区抽蓄电站沥青混凝土面板堆石坝抗震稳定性分析[J]. 水电能源科学,2024,42(1):102-105.
- [15] 邹德高,彭俊,李俊超,等. 沥青混凝土面板堆石坝强震变形模式和极限抗震能力分析[J]. 水电与抽水蓄能,2022,8(6):15-20.

(上接第 175 页)

- [16] 胡东旭,李贤,周超云,等. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析[J]. 岩土力学,2018,39(S1):318-324.
- [17] 杨振北. 干湿循环效应下膨胀土裂隙演化规律及水力——力学特性研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [18] 杨圣涛,吕岩,贺元源,等. 基于 CT 扫描的草炭土孔隙结构分析及渗流模拟[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1354-1365.
- [19] 韩毅,汪时机,李贤,等. 圆柱孔破损膨胀土扫描数据的三维重建研究[J]. 西南师范大学学报,2015.
- [20] 唐朝生,崔玉军,Anh-minh Tang,等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.
- [21] 曹宇清,吴永,安向勇,等. 考虑应力历史和应力水平影响的土体压缩模量计算方法[J]. 工程地质学报,2019,27(4):760-765.
- [22] 崔广芹,秦迪,尚志成,等. 冻融循环作用下粉质砂土的压缩变形特性研究[J]. 水利水电技术,2017,48(11):174-178.
- [23] 於永和,李素艳. 高填路堤地基压缩模量研究[J]. 路基工程,2006(5):35-36.
- [24] 曹宇清,吴永,安向勇,等. 考虑应力历史和应力水平影响的土体压缩模量计算方法[J]. 工程地质学报,2019,27(4):760-765.
- [25] Wang Jie, Li Wangcheng, Mu Min, et al. Particle size composition characteristics of weathered debris from grey-green slate under the action of freeze-thaw and dry-wet cycles[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):1421.
- [26] 赵仕威,周小文,刘文辉,等. 考虑颗粒棱角影响的直剪试验的离散元模拟[J]. 岩土力学,2015,36(S1):602-608.
- [27] 韦秉旭,黄震,杨俭. 基于波速的膨胀土损伤变量与抗剪强度的关系研究[J]. 公路交通科技,2015,32(6):39-45.